

pH 调控预水解对蔬菜废物机械破碎能耗的影响

何晶晶^{1,2}, 王方¹, 吕凡¹, 邵立明^{1,2}

(1. 同济大学 固体废物处理与资源化研究所, 上海 200092;

2. 住房和城乡建设部村镇建设司农村生活垃圾处理技术研究培训中心, 上海 200092)

摘要: 采用控制初始 pH 值分别为 5, 6, 7, 8 和 9 的泔水滤液预水解蔬菜废物, 研究原样和预水解后废物的机械破碎能耗。结果表明: 在 pH 值为 7, 8 和 9 的工况下, 蔬菜废物的机械破碎能耗由原样的 $0.304 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ (湿基) 下降至 0.032, 0.025 和 $0.027 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ (湿基), 下降幅度近 90%; 而 pH 值为 5 和 6 的工况下的机械破碎能耗仅下降至 0.200 和 $0.219 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ (湿基)。在 8 h 预水解过程中, pH 值为 6, 7, 8 和 9 工况的液相 pH 值、总有机碳、挥发性脂肪酸和氨氮的质量浓度以及固相木质纤维素的质量分数没有显著变化, 说明蔬菜废物未发生显著的生物水解; 溶胀吸水 and 纤维素在碱性环境下结构变化而造成的强度降低可能是蔬菜废物机械破碎能耗下降的主要原因。

关键词: 蔬菜废物; 预水解; pH; 机械破碎; 能耗

中图分类号: X705

文献标志码: A

Effect of pH-regulated Pre-hydrolysis on the Energy Consumption of Mechanical Size Reduction of Vegetable Wastes

HE Pinjing^{1,2}, WANG Fang¹, LÜ Fan¹, SHAO Liming^{1,2}

(1. Institute of Waste Treatment and Reclamation, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Centre for the Technology Research and Training on Household Waste in Small Towns & Rural Area of the Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, Shanghai 200092, China)

Abstract: Pre-hydrolysis of vegetable wastes was conducted with swill at different initial pH equal to 5, 6, 7, 8, and 9, and then the energy consumption of mechanical size reduction of raw and pre-hydrolysed vegetable wastes was studied. Experimental results showed that at initial pH equal to 7, 8 and 9, the energy consumptions of vegetable wastes after pre-hydrolysis were decreased from the original $0.304 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ (wet basis) to 0.032, 0.025 and $0.027 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ (wet basis), respectively, which declined by up to 90%; while those at initial pH equal to 5 and 6 slightly dropped to 0.200 and 0.219

$\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$ (wet basis). During the 8 h pre-hydrolysis at initial pH equal to 6, 7, 8 and 9, the pH and mass concentration of total organic carbon, volatile fatty acids and ammonia nitrogen in the liquid phase as well as the mass fraction of lignocellulose in the solid phase had little variations, indicating that the effect of biotic hydrolysis was not obvious. The swelling and moisture-absorbing and the structural change of celluloses under alkaline conditions, which can reduce the strength of lignocellulosic material, might be the main reasons for the decrease of energy consumption for mechanical size reduction.

Key words: vegetable waste; pre-hydrolysis; pH; mechanical size reduction; energy consumption

2012 年我国蔬菜年产量已超 7 亿 t^[1], 在蔬菜销售、流通和消费等环节产生的大量蔬菜废物成为生活垃圾中生物可降解组分的主要来源之一。蔬菜废物的有机物质质量分数约为总固体质量 (TS) 的 90%^[2], 若能采用厌氧消化工艺处理, 则可以在有效实现其减量化的同时, 还能以甲烷的形式回收生物质能源, 实现资源化利用^[3-4]。

机械破碎可降低物料粒径、增加物料的容积密度和比表面积以及破坏纤维等大分子物质, 从而改善物料的生化反应特性, 有效提高其水解效率和厌氧消化效率^[5-6]。但是, 机械破碎会大幅增加运行能耗, 如将木质纤维类废物机械破碎至 1 mm, 所需能量可达其厌氧消化全过程能量消耗的三分之一^[7]; 将玉米干草机械破碎至 1.2 mm 的能耗, 约为其厌氧产沼所得能量的 33%^[8-10]。在处理生活垃圾 (生物可降解组分大于 50%) 的机械生物处理厂中, 锤式破碎和剪切破碎设备的单位能耗约为 $50 \sim 100 \text{ kWh} \cdot \text{t}^{-1}$ ^[11]; 而生活垃圾厌氧消化的单位能量净得率约为 $120 \sim 220 \text{ kWh} \cdot \text{t}^{-1}$ 或热能 $210 \sim 390 \text{ kWh} \cdot \text{t}^{-1}$ ^[12]。若能有效降低在我国生活垃圾中占绝大部分

收稿日期: 2014-03-04

基金项目: 国家“九七三”重点基础研究发展计划 (2012CB719801); 上海市“科技创新行动计划”技术标准项目 (14DZ0501500)

第一作者: 何晶晶 (1962—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为固体废物处理与资源化。E-mail: solidwaste@tongji.edu.cn

的生物可降解组分(蔬菜废物是其中的重要组成部分)的破碎能耗,则可以在提高其厌氧消化效率的同时增加能量净得率。

浸泡可以使废物纤维结构因溶胀吸水而疏松、强度降低而减少其破碎能耗^[13]。采用含有水解酶的溶液浸泡处理生物质废物,还可能水解部分蛋白质、纤维素等对废物强度贡献较大的大分子物质,从而进一步降低废物强度^[14]。Zhang 等^[15]和 Lü 等^[16]发现,甲烷化反应器出水浸泡蔬菜和花卉废物可以显著提高固体的液化率。pH 是影响废物水解、酸化的重要因素^[17],在短时间浸泡条件下,pH 对蔬菜废物纤维组织及其破碎能耗的影响尚不清晰。

本文在控制不同初始 pH 的条件下,用泔水滤液对蔬菜废物进行短时间浸泡预水解,分析预水解后废物的破碎能耗、生物质组成和水解液的性质,探索降低蔬菜废物机械破碎能耗的预水解 pH 条件以及降低蔬菜废物破碎能耗的作用机制。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

在上海市某副食品市场现场调研分类,确定蔬菜废物的代表性组成及其相应的比例。结果表明,质量分数为 90%以上的组分为叶茎类蔬菜中的生菜、青菜、白菜、卷心菜和芹菜。按确定的代表性组成以湿重比为 1:1:1:1:1 人工配制蔬菜废物进行后续预水解试验。其 TS 质量分数为 7.62%,挥发性固体(VS)质量占 TS 的 92.3%,C 和 N 质量分别占 TS 的 37.2%和 2.98%。蔬菜废物的纤维素、半纤维素和木质素质量分别为 TS 的 20.17%,8.89%和 2.74%。用于浸泡预水解的泔水滤液取自上海市某大学食堂,经 0.45 μm 混合纤维素酯滤纸过滤,pH 为 5.63,总有机碳(TOC)质量浓度为 906.7 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,总氮(TN)质量浓度为 353.3 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,氨氮质量浓度为 269.1 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

1.2 试验步骤

称取初始含水率为 93.31%的蔬菜废物 500 g 置于 2 L 聚乙烯塑料瓶中,加入 1.5 L 用 1 mol $\cdot \text{L}^{-1}$ 的 HCl 或 NaOH 溶液调节 pH 为 5,6,7,8 和 9 的泔水滤液(对应的工况分别为 pH 5,pH 6,pH 7,pH 8 和 pH 9)。将聚乙烯塑料瓶固定于翻转摇床,以 20 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的转速振荡 8 h。处理过程中,每小时停止摇床,用移液管取出 10 mL 液相样品,测定其 pH 和氨氮质量浓度;经 0.45 μm 滤膜过滤后,测定

TOC 和挥发性脂肪酸(VFAs)的质量浓度。

8 h 预水解结束后,将蔬菜废物置于筛孔为 10 mm 的筛网上,振动筛网,并静止 1 h,以充分去除自由水,再称量筛上物质量,比较预水解前后蔬菜废物质量的变化。然后,将蔬菜废物置于自制的格栅刀系统^[14]进行机械破碎试验,并测定其破碎能耗。收集机械破碎后的蔬菜废物,取样分析其固相纤维素、半纤维素和木质素质量分数。

1.3 测试方法

蔬菜废物的 TS 由 70 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱烘至恒重后测得,VS 由马弗炉 600 $^{\circ}\text{C}$ 灼烧 2 h 后测得,样品质量均由精度为万分之一的电子分析天平(HANGPING FA2004 型,上海精科天平仪器厂)称量。采用数字 pH 仪(pHS-2F,上海精密科学仪器有限公司)测定 pH;采用 TN/TC multi N/C 3000 Analyzer (Analytik JenaAG,Germany)测定 TOC 质量浓度;采用高效液相色谱(LC-20AD,Shimadzu,Japan)测定 VFAs 等有机酸(包括乳酸、甲酸、乙酸、丙酸、丁酸、异丁酸、戊酸和异戊酸)的质量浓度;采用蒸馏滴定法测定氨氮的质量浓度^[18];采用 CHNS Determinator(varioEL,Germany)分析 C 和 N 元素的质量分数;分别用中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维和灰分的测定方法^[19]获得纤维素、半纤维素和木质素的质量分数。

使用自制格栅刀系统和万能试验机测定机械破碎试验的结果。格栅刀系统为参考文献[20]并自主设计的,由格栅刀架、进料箱、活塞板和刀片构成。刀片间距为 20 mm,以网格状分布固定于刀架。在进料箱中置入蔬菜废物后,活塞板连接万能试验机的撞锤以测定荷载-位移曲线。万能试验机(长春试验机研究所,CSS-200 型)的横梁下降速率设定为 10 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$,使用软件 TestExpert.NET 控制程序,并记录系统随位移变化的荷载数据。将荷载-位移曲线数据输入软件 Origin Pro 8.0 后,积分计算得到曲线下的面积,即为机械破碎的能耗。

2 试验结果与讨论

2.1 固相机械破碎指标

经不同 pH 预水解后,蔬菜废物的机械破碎荷载-位移曲线如图 1 实线所示,虚线所对应的横坐标数值代表物料全部破碎时撞锤的位移。在机械破碎过程中,蔬菜废物因受压,物料间空隙不断减少,压实到一定程度后,在刀片和活塞板的双重作用下发

生剪切破碎. 由图 1 可知, pH 5 和 pH 6 两工况下的撞锤位移接近原样(即新鲜蔬菜废物)的试验值(约 30 mm), 但最大荷载仅为原样的一半. pH 7, pH 8 和 pH 9 的最大荷载由原样的 21.7 kN 分别降低至 20.5, 14.5 和 14.3 kN, 不过撞锤位移仅为原样的 10% 左右. 以上结果表明, 酸性预水解处理后, 蔬菜废物的可压缩性变化很小; 而中性和碱性预水解后,

蔬菜废物的可压缩性均迅速降低. 表 1 为积分计算获得的机械破碎能耗. 原样的机械破碎能耗为 $0.304 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ (湿基); 在酸性工况预水解后, 能耗下降 33% 左右, 约为 $0.200 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ (湿基); 但是, 碱性工况预水解后, 能耗下降可达 90%, 仅需 $0.030 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ (湿基).

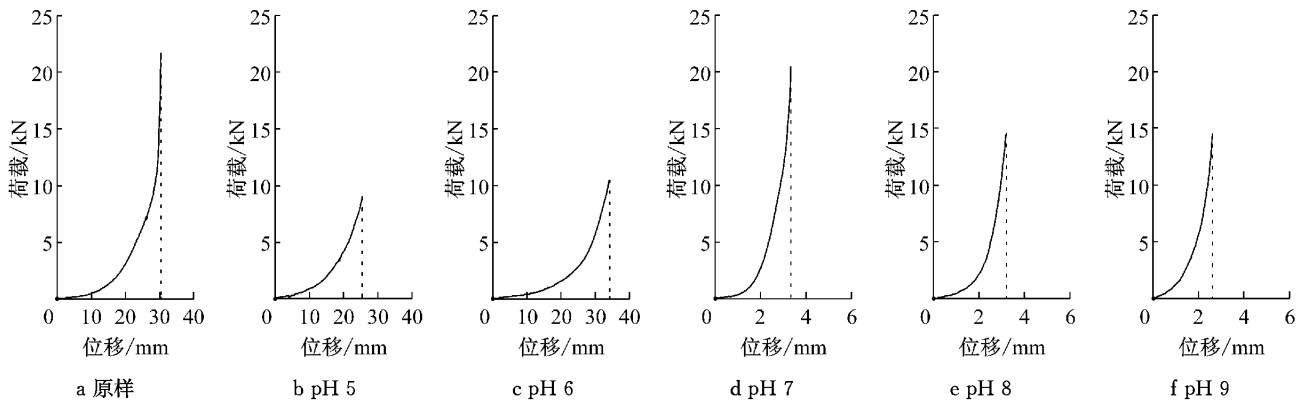


图 1 预水解后蔬菜废物的荷载-位移曲线

Fig. 1 Load-displacement curves of vegetable wastes after pre-hydrolysis

表 1 预水解后蔬菜废物的机械破碎能耗

Tab. 1 Energy consumption of mechanical size reduction of vegetable wastes after pre-hydrolysis ($\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$)

样品	湿基	干基	样品	湿基	干基
原样	0.304	3.988	pH 7	0.032	0.425
pH 5	0.200	2.628	pH 8	0.025	0.333
pH 6	0.219	2.875	pH 9	0.027	0.363

2.2 固相组成

2.2.1 质量

各 pH 工况预水解后, 蔬菜废物的干固体质量维持恒定(变化率在 $-0.17\% \sim 0.31\%$ 范围内). 含水率分别由原样 93.31% 增加至 93.90%, 94.17%, 94.31%, 94.12% 和 94.04%; 质量也分别增加了 9.7%, 15.0%, 17.4%, 13.7% 和 12.6%.

2.2.2 木质纤维素质量分数

木质纤维素是提供植物强度的主要生物物质组成, 是破碎能耗的主要贡献者. 各工况预水解前后, 固相中木质纤维素质量分数(以干基计)的变化如图 2 所示. 与原样相比, 预处理前后蔬菜废物中纤维素、半纤维素和木质素的质量分数均没有显著变化; pH 7, pH 8 和 pH 9 工况的变化在 $\pm 1\%$ 范围内; pH 5 和 pH 6 工况的木质纤维素总质量分数较原样仅分别降低了 2.6% 和 3.0%. 这主要是由于半纤维素和纤维素质量分数的降低所致. 已知样品的干固体质量基本不变, 因此, 8 h 预水解对蔬菜废物中木质纤维素类物质的水解转化作用并不显著.

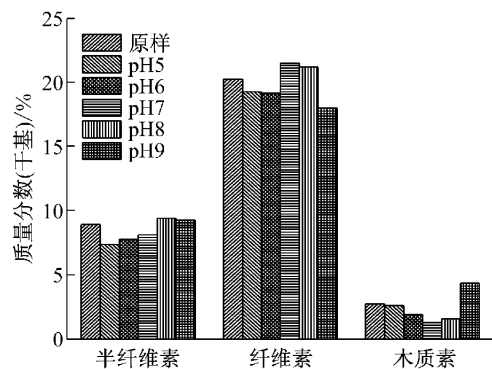


图 2 预水解后蔬菜废物半纤维素、纤维素和木质素的质量分数

Fig. 2 Hemicellulose, cellulose and lignin mass fraction of vegetable wastes after pre-hydrolysis

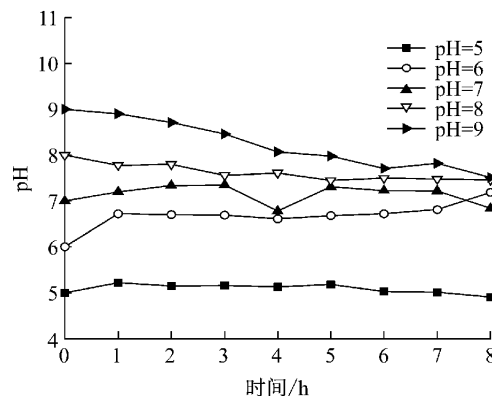


图 3 液相 pH 值的变化

Fig. 3 Changes of pH of liquid phase

2.3 液相性质

2.3.1 pH 值

图 3 为蔬菜废物液相 pH 值的变化. 在 8 h 预水解过程中,pH 5,pH 7 和 pH 8 工况下的液相 pH 值整体变化幅度较小,pH 9 工况的 pH 值下降至 7.51,而 pH 6 工况的 pH 值上升至 7.19. 除了 pH 5 外,其余工况经过 8 h 预处理后液相 pH 值趋向中性范围.

2.3.2 液相总有机碳

蔬菜废物预水解过程中,液相 TOC 的变化如图 4 所示. 与泔水滤液的 TOC 本底值相比,pH 5 至 pH 9 工况预水解 1 h 后的液相 TOC 质量浓度分别增加了 79.7%,46.2%,30.1%,20.9%和 30.0%. pH 5 工况的 TOC 在预水解 8 h 后提高至 1 934 mg · L⁻¹(增加了 113%). pH 6 工况的 TOC 质量浓度在 2 h 后快速上升至 1 858 mg · L⁻¹,8 h 后下降至 1 076 mg · L⁻¹(增加了 18.7%). 其余工况均呈下降趋势,8 h 后约为 700 mg · L⁻¹(减少了 13.5%~27.1%). 液相 TOC 质量浓度的增加主要源于反应底物的水解,而微生物的代谢也会消耗有机碳,从而使 TOC 质量浓度下降. 总体而言,中性及碱性工况下的水解作用不如酸性工况下的明显. pH 5 和 pH 6 条件下液相 TOC 质量的增加量相当于原料总 C 质量的 10.9%和 1.8%. 即 pH 5 条件下,预处理后的蔬菜废物若后续进行厌氧消化,固相产率率可能会有所下降.

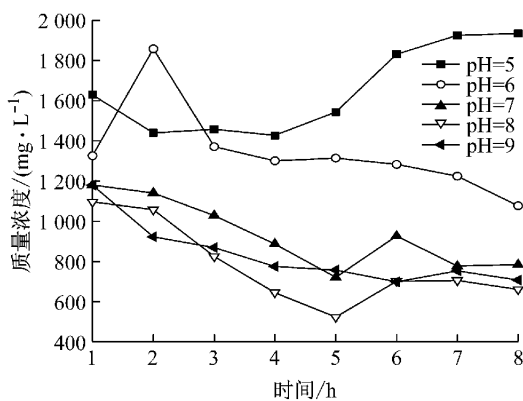


图 4 液相总有机碳的变化

Fig.4 Changes of total organic carbon of liquid phase

2.3.3 挥发性脂肪酸

根据不同挥发性脂肪酸(VFAs)分子式中的 C 原子数计算 VFAs 中碳(VFAs-C)的质量占液相总有机碳质量的分数可评价液相 TOC 的酸化率. 总体而言,预水解过程中,pH 8 和 pH 9 工况下 TOC 中 VFAs-C 的比例高于 pH 5,pH 6 和 pH 7,这说明初

始碱性条件更有利于液相 TOC 的酸化. 8 h 预水解处理后,各工况下的 VFAs-C 占 TOC 的质量分数依次为 39.9%,71.8%,65.8%,81.8%和 68.5%,以 pH 8 工况的酸化程度最高. 蔬菜废物的液相 VFAs 组成和质量浓度变化如图 5 所示. 各工况下的 VFAs 主要由乙酸、丙酸和丁酸构成,仅在 pH 8 工况中检测到异丁酸. 在各工况中,乙酸的质量占 VFAs 一半以上. pH 8 和 pH 9 条件下的 VFAs 质量浓度总体呈下降趋势,而工况 pH 5,pH 6 和 pH 7 的 VFAs

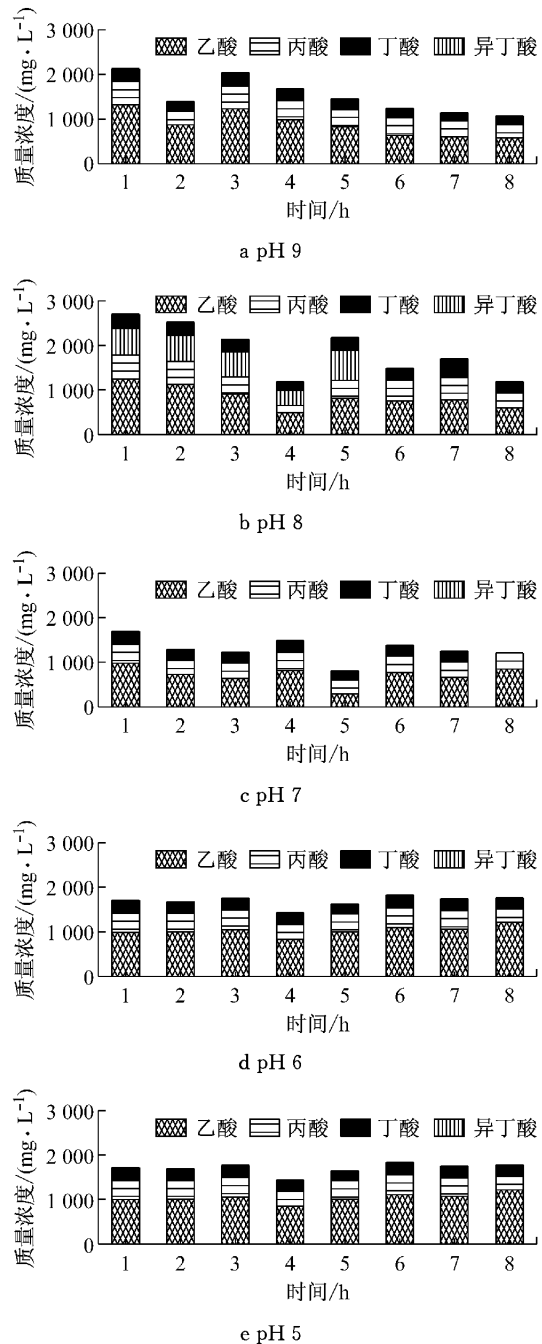


图 5 液相挥发性脂肪酸的组成与质量浓度的变化

Fig.5 Changes of composition and mass concentration of volatile fatty acids of liquid phase

质量浓度则在预水解过程中基本不变. 何晶晶等^[21]的研究表明, 采用体积分数为 10% 的乙酸进行 48 h 常温预处理能水解半纤维素, 但对纤维素的水解作用并不明显, 而木质素则没有被水解. 结合图 2 可知, 在乙酸占主导的水解环境中, 蔬菜废物木质纤维素总质量分数的变化小于 3%, 木质素的包裹作用可能是阻碍纤维素和半纤维素水解的主要原因.

2.4 讨论

水解可以破坏构成有机组分结构强度的聚合物分子, 从而降低破碎能耗. 8 h 预水解后, pH 5 工况下液相 TOC 质量的增加量占初始固相碳质量的 10.9%, 氨氮质量浓度增加至 $637 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 而 pH 6 至 pH 9 工况下液相 TOC 和 VFAs 的质量浓度没有显著增加, 氨氮质量浓度也维持在 $100 \sim 400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 间, TOC 的质量变化量占初始固相碳质量的一 2.6%~1.8%, 表明蔬菜废物的生物水解程度非常有限. 相较于纤维素和半纤维素, 木质素是维持植物细胞机械强度的主要因素^[22], 且它们的生物可降解性均很低^[23]. 经预水解处理后, 蔬菜废物中的纤维素和半纤维素, 特别是木质素的质量分数没有显著减少. 因此, 水解作用和木质纤维素的降解/去除不是本文中蔬菜废物机械破碎能耗降低的主要原因.

预水解处理后蔬菜废物的质量增加 9.7%~17.4%, 表明蔬菜废物在处理过程中吸收了水分. 由于本试验中蔬菜废物处于高电解质含量的泔水滤液中, 渗透作用较弱. 因此, 溶胀作用是蔬菜废物质量增加的主要原因, 即其中含有的纤维素、淀粉等亲水物质在水分饱和的环境中通过氢键与水分子结合^[24]. 溶胀作用可减少蔬菜废物细胞单位体积内纤维素、半纤维素和木质素分子的数目, 减弱细胞壁中木质纤维间的联结力, 软化细胞壁, 从而降低强度和破碎能耗^[25-27]. 此外, 碱处理能够将纤维素 I 转变为纤维素 II, 降低纤维素结晶度^[28], 破坏木质素结构^[29], 从而减小机械破碎能耗^[30]. 所以, 初始 pH 为碱性的工况中, 纤维素结构可能发生了变化, 致使碱性工况下浸泡预处理后, 蔬菜废物的机械破碎能耗远低于酸浸泡的能耗. Luo 等^[31]采用剪切破碎机破碎未经预处理的厨余垃圾, 其破碎能耗为 $7.5 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ (干基); 邵立明等^[14]在碱性条件下研究了预水解时间对蔬菜废物机械破碎能耗的影响, 发现采用 4 h 预水解处理可使蔬菜废物的单位破碎能耗下降 22.67%; Miao 等^[32]认为含水率对生物质的机械破碎能耗有显著影响, 而锤式粉碎机比刀式粉碎机的

能量利用效率更高. 本试验在调节初始 pH 为 5~9 条件下, 得到自制格栅刀系统处理蔬菜废物的剪切破碎能耗为 $0.363 \sim 3.988 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ (干基); 而 pH 为 7, 8 和 9 工况下, 蔬菜废物的单位破碎能耗相比原样下降了约 90%, 说明 pH 调控下的预水解能够有效地降低蔬菜废物的机械破碎能耗.

3 结论

采用具有水解环境条件的泔水滤液, 控制初始 pH 为 5, 6, 7, 8 和 9, 对蔬菜废物进行 8 h 预水解处理, 蔬菜废物的单位机械破碎能耗分别由原样 $0.303 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ (湿基) 降低至 $0.200, 0.219, 0.032, 0.025$ 和 $0.027 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ (湿基). 中性和碱性条件预水解后, 单位机械破碎能耗的下降幅度达到近 90%. 蔬菜废物经 8 h 预水解后, 机械破碎能耗降低的主要原因是亲水物质的溶胀作用, 其中碱性工况下机械破碎能耗大幅降低, 可能是因为纤维素在碱性环境中结构发生了改变. 综合单位破碎能耗与水解酸化程度, 采用中性或弱碱性 (pH 为 7, 8 和 9) 环境预水解处理最有利于降低蔬菜废物的机械破碎能耗.

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2013[M]. 北京: 中国统计出版社, 2013.
The National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. Chinese statistics yearbook 2013[M]. Beijing: China Statistics Press, 2013.
- [2] Zhang B, He P, Lu F, *et al.* Enhancement of anaerobic biodegradability of flower stem wastes with vegetable wastes by co-hydrolysis[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, 20(3): 297.
- [3] Gunaseelan V N. Biochemical methane potential of fruits and vegetable solid waste feedstocks[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2004, 26(4): 389.
- [4] Bouallagui H, Ben Cheikh R, Marouani L, *et al.* Mesophilic biogas production from fruit and vegetable waste in a tubular digester[J]. *Bioresource Technology*, 2003, 86(1): 85.
- [5] Schell D, Harwood C. Milling of lignocellulosic biomass[J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 1994, 45/46(1): 159.
- [6] Palmowski L M M J A. Anaerobic degradation of organic materials-significance of the substrate surface area[J]. *Water Science & Technology*, 2003, 47(12): 231.
- [7] Walsum G P, Allen S, Spencer M, *et al.* Conversion of lignocellulosics pretreated with liquid hot water to ethanol[M]. Vail: Humana Press, 1996.
- [8] Hoque M, Sokhansanj S, Naimi L, *et al.* Review and analysis of performance and productivity of size reduction equipment for

- fibrous materials [C]//2007 ASABE Annual International Meeting. Minneapolis: ASABE, 2007:1-18.
- [9] Tricase C, Lombardi M. State of the art and prospects of Italian biogas production from animal sewage: Technical-economic considerations[J]. *Renewable Energy*, 2009, 34(3): 477.
- [10] Zheng M, Li X, Li L, *et al.* Enhancing anaerobic biogasification of corn stover through wet state NaOH pretreatment[J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(21): 5140.
- [11] Caputo A C, Pelagagge P M. RDF production plants: I design and costs[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2002, 22(4): 423.
- [12] Fricke K, Santen H, Wallmann R. Comparison of selected aerobic and anaerobic procedures for MSW treatment [J]. *Waste Management*, 2005, 25(8): 799.
- [13] Larsson P, Gimåker M, Wågberg L. The influence of periodate oxidation on the moisture sorptivity and dimensional stability of paper[J]. *Cellulose*, 2008, 15(6): 837.
- [14] 邵立明,彭伟,邱伟坚,等. 预水解时间对蔬菜类废物机械破碎能耗的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(3): 608. SHAO Liming, PENG Wei, QIU Weijian, *et al.* Effect of pre-hydrolysis time on energy consumption during mechanical size reduction of vegetable wastes [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(3): 608.
- [15] Zhang B, He P, Lü F, *et al.* Extracellular enzyme activities during regulated hydrolysis of high-solid organic wastes [J]. *Water Research*, 2007, 41(19): 4468.
- [16] Lü F, He P J, Hao L P, *et al.* Impact of recycled effluent on the hydrolysis during anaerobic digestion of vegetable and flower waste [J]. *Water Science and Technology*, 2008, 8(58): 1637.
- [17] Lü F, Shao L M, Bru V, *et al.* Synergetic effect of pH and biochemical components on bacterial diversity during mesophilic anaerobic fermentation of biomass-origin waste [J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2009, 106(2): 580.
- [18] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002. State Environmental Protection Administration. *Water and wastewater monitoring analysis method* [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [19] 熊素敏,左秀凤,朱永义. 稻壳中纤维素、半纤维素和木质素的测定[J]. *粮食与饲料工业*, 2005, 12(8): 40. XIONG Sumin, ZUO Xiufeng, ZHU Yongyi. Determination of cellulose, hemicellulose and ligin in rice hull [J]. *Cereal & Feed Industry*, 2005, 12(8): 40.
- [20] Igathinathane C, Womac A R, Sokhansanj S, *et al.* Knife grid size reduction to pre-process packed beds of high- and low-moisture switchgrass [J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(7): 2254.
- [21] 何晶晶,方文娟,吕凡,等. 乙酸常温预处理对木质纤维素厌氧消化的影响[J]. *中国环境科学*, 2008, 28(12): 1116. HE Pinjing, FANG Wenjuan, LÜ Fan, *et al.* Impact of acetic acid pretreatment at normal temperature on the anaerobic digestion of lignocelluloses [J]. *China Environmental Science*, 2008, 28(12): 1116.
- [22] Jones L, Ennos A R, Turner S R. Cloning and characterization of irregular xylem4 (irx4): A severely lignin-deficient mutant of Arabidopsis [J]. *The Plant Journal*, 2001, 26(2): 205.
- [23] Ren N, Wang B, Huang J. Ethanol-type fermentation from carbohydrate in high rate acidogenic reactor [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 1997, 54(5): 428.
- [24] 张立军,梁宗锁. 植物生理学[M]. 北京: 科学出版社, 2007. ZHANG Lijun, LIANG Zongsuo. *Phytophysiology* [M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [25] 蒋高明. 植物生理生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004. JIANG Gaoming. *Plant ecophysiology* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2004.
- [26] 徐有明. 木材学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2006. XU Youming. *Xylology* [M]. Beijing: China Forestry Press, 2006.
- [27] 陶劲松,刘焕彬,陈小泉,等. 纸页水分含量对纤维相对结合面积和剪切抗张强度的影响[J]. *造纸科学与技术*, 2007, 26(2): 1. TAO Jinsong, LIU Huanbin, CHEN Xiaoquan, *et al.* Effect of sheet moisture content on fiber relative bonded area and shear tensile strength [J]. *Paper Science and Technology*, 2007, 26(2): 1.
- [28] Eronen P, Österberg M, Jääskeläinen A. Effect of alkaline treatment on cellulose supramolecular structure studied with combined confocal Raman spectroscopy and atomic force microscopy [J]. *Cellulose*, 2009, 16(2): 167.
- [29] Suksombat W. Comparison of different alkali treatment of bagasse and rice straw [J]. *Asian Australasian Journal of Animal Sciences*, 2004, 17(10): 1430.
- [30] 黄鑫鑫,郭嫣,钱现. 碱处理对亚麻纤维性能的影响[J]. *西安工程科技学院学报*, 2007, 21(5): 576. HUANG Xinxin, GUO Yan, QIAN Xian. The effect of alkali treatment to the properties of flax fibers [J]. *Journal of Xi'an University of Engineering Science and Technology*, 2007, 21(5): 576.
- [31] Luo S, Yang X, Tao X, *et al.* Research on the optimization of a novel municipal solid waste shredder [J]. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2013, 5(1): 13111.
- [32] Miao Z, Grift T E, Hansen A C, *et al.* Energy requirement for comminution of biomass in relation to particle physical properties [J]. *Industrial crops and products*, 2011, 33(2): 504.